



TITLE:

シリーズ:研究内容紹介・研究室紹介

AUTHOR(S):

CITATION:

シリーズ:研究内容紹介・研究室紹介. Cue 2000, 6: 22-38

ISSUE DATE:

2000-12

URL:

<https://doi.org/10.14989/57811>

RIGHT:

シリーズ：研究内容紹介

このページでは、電気系関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(※印は「新設研究室」、☆は「大学の研究・動向」のページに掲載)

電気系関係研究室一覧

工学研究科

電気工学専攻

複合システム論講座 (荒木研)

電磁工学講座 **電磁エネルギー工学分野** (島崎研)

電磁工学講座 超伝導工学分野 (牟田研)

電力工学講座 **電力発生伝送工学分野** (宅間研)

電力工学講座 電力変換制御工学分野

電気システム論講座 **電気回路網学分野** (奥村研)

電気システム論講座 自動制御工学分野

電気システム論講座 電力システム分野

電子物性工学専攻

集積機能工学講座 (鈴木研)

電子物理学講座 **極微真空電子工学分野** (石川研)

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (橋研)

機能物性工学講座 **半導体物性工学分野** (松波研)

機能物性工学講座 電子材料物性工学分野 (松重研)

量子工学講座 **光材料物性工学分野** (藤田研) ☆

量子工学講座 **光子電子工学分野** (野田研) ※

量子工学講座 量子電磁工学分野 (北野研)

イオン工学実験施設

高機能材料工学講座

情報学研究科

知能情報学専攻

知能メディア講座 言語メディア分野

知能メディア講座 **画像メディア分野** (松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座 **デジタル通信分野** (吉田研)

通信システム工学講座 伝送メディア分野 (森広研)

集積システム工学講座 **大規模集積回路分野** (小野寺研)

集積システム工学講座 情報回路方式論分野 (中村研)

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤研)

通信システム工学講座 **知的通信網分野** (高橋研) ※

システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研)

システム情報論講座 **医用工学分野** (松田研) ※

エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野 (吉川栄研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研)

エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 **プロセスエネルギー学分野** (塩津研) ☆

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野 (井上研)

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野 (吉川潔研)

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (大引研)

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研)

宙空電波科学研究センター

地球電波科学研究部門

大気圏光電波計測分野 (津田研)

グローバル大気情報解析分野

宇宙電波科学研究部門

宇宙電波工学分野 (松本研)

電波科学シミュレーション分野 (大村研) ※

電波応用工学研究部門

マイクロ波エネルギー伝送分野 (橋本研)

レーダーリモートセンシング工学分野 (深尾研)

京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (KU-VBL)

研究室紹介

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室）

「強磁性体媒体におけるヒステリシス渦電流場の解析」

強磁性体材料は、電気機器の分野では鉄心材料、磁気記憶の分野では磁気ヘッドや記憶媒体など、電気工学の分野で広く用いられている不可欠な材料である。ところが、有限要素法などを用いた電磁界解析の際には、ヒステリシス特性表現の困難さから、強磁性体のヒステリシス特性は無視されることが多かった。しかし、電気機器の解析の際には、ヒステリシス損や残留磁気などのヒステリシス特性の評価は重要である。そこで、最近、プライザッハモデルやその他のヒステリシスモデルを用いた電磁界解析が試みられているが、電磁界解析に適したヒステリシスモデルは未だ確立されていない。特に、実際の強磁性体はベクトルヒステリシス特性を持っているため、磁界ベクトルと磁束密度ベクトルの関係を与えるベクトルヒステリシスモデルの開発が必要である。

本研究では、プレイヒステロンまたはストップヒステロンの重ね合わせとしてベクトルヒステリシスモデルを構成し、そのモデルを用いて簡単な渦電流解析を行った。プレイヒステロンモデルのヒステリシス特性は静的スカラプライザッハモデルによる特性と等価であるが、プレイヒステロンモデルの方が記憶容量が少なく済み、アルゴリズムも簡略である。また、ストップヒステロンモデルは、プレイヒステロンモデルと同等の簡略性を持ち、かつ、磁束密度から磁界を直接求めることができるため、磁気ベクトルポテンシャルを用いた有限要素法解析の際に有効であると考えられる。

ストップヒステロンの重ね合わせにより構成したヒステリシス特性の例を図1に示す。図1の磁気特性を持つ消磁された鉄心(図2)に対して、交流電界(50Hz)を断面に垂直に印加した場合の磁界変化を解析した。図3に磁界と磁束密度の分布の例を示す。図3では、渦電流のため内部への磁界の浸透が妨げられており、同図(b)では、残留磁束のため、中心付近の磁束密度は磁界や表面付近の磁束密度と逆方向になっている。図4に鉄心を通る全電流(強制電流と渦電流の和)の変化を示す。図4には、消磁状態から開始した場合とともに、大きな直流電界を印加して鉄心を偏磁させてから交流電界を加えた場合も示している。図4より、偏磁により大きな突入電流が流れることがわかる。このように、解析では、渦電流の効果や、ヒステリシス特性による残留磁束などの効果を表現することができた。今後、実際の機器に即した3次元電磁界解析や、ベクトルヒステリシスモデルに関する更なる検討が必要である。

参考文献：T. Matsuo, Y. Osaka, M. Shimasaki, IEEE Trans. Magn.,36, 1172(2000).

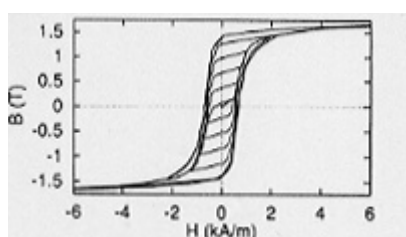


図1 ヒステリシス特性

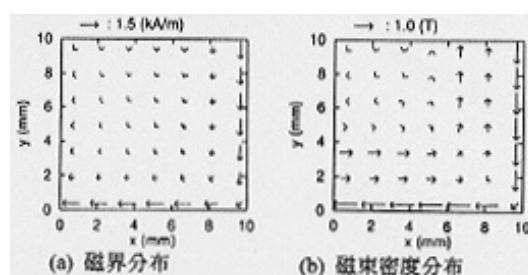


図3 渦電流解析結果(電界振幅1V/m, t=17msec)

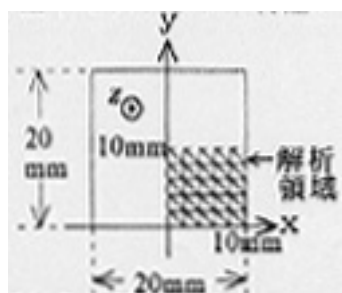


図2 解析対象と解析領域(導電率1MS/m)

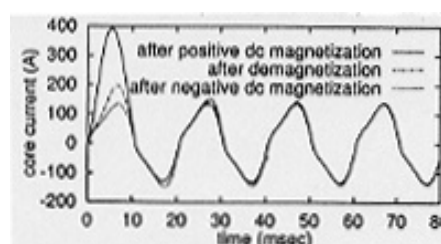
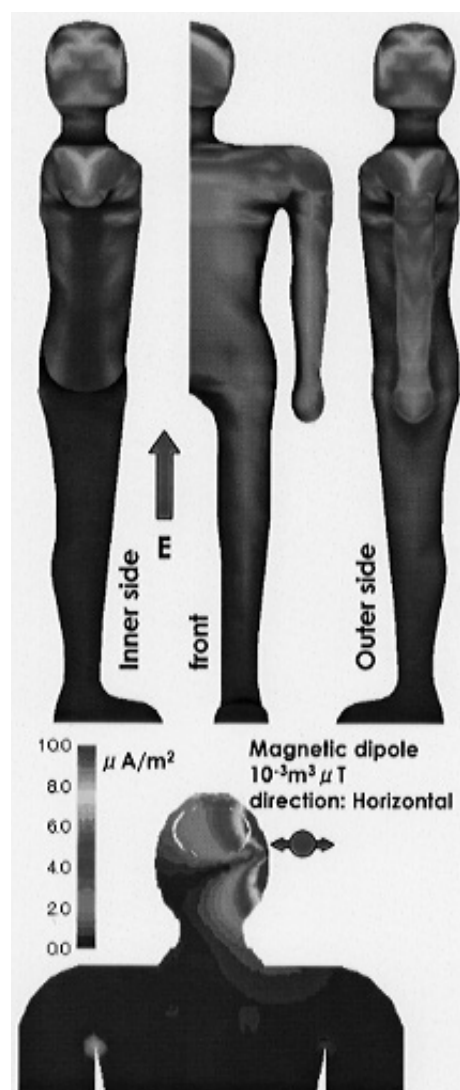
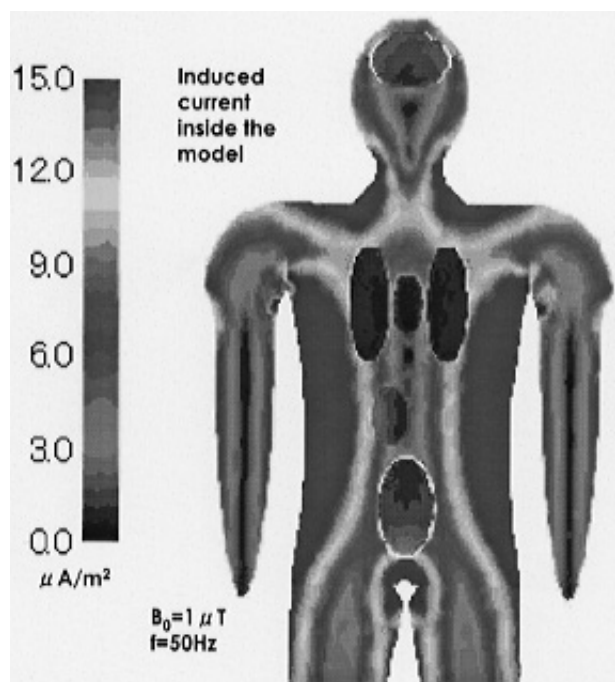


図4 鉄心電流

電力工学講座 電力発生伝送工学分野（宅間研究室） 「数値電界計算法の性能向上とその電力工学分野への応用」

数値電界計算技術は電気工学分野において不可欠な基礎技術の一つです。当研究室では表面電荷法・境界要素法に代表される境界分割型の解法について、計算技術の向上を図るとともに、高電圧・電力工学の諸問題への適用を行なっています。主な適用対象は、高電圧機器（最大電界の推定と絶縁性能評価）・3重点電界の計算（特異点近傍電界の評価）・帯電電荷測定（電荷分布測定法と放電開始への影響調査）・放電モデリング（モデリングと絶縁破壊の評価）・人体内誘導電界および誘導電流計算（商用50, 60Hz電磁界の影響調査）などです。高電圧放電分野の計算対象は、多くの場合電界集中を防ぐために曲面形状に加工されており、また人体の計算では必然的に曲面を取り扱う必要があることから、高度なサーフェスマデリングと連携した境界分割型の電界計算法が適しています。また、放電現象が関連する計算対象では、電界（電位ではなく）に対して高い計算精度が要求され、この点でも境界分割型の解法が有利です。今回は、人体モデル内外の電界・電流分布の計算結果を図面にして紹介いたします。商用高電圧（送電線周辺など）による静電誘導（右上図）・電磁誘導（左下図）および商用家電製品（ヘアドライヤー）による電磁誘導（右下図）の例です。遺伝子レベルでの電磁界の影響調査は目的ではありませんが、マクロなレベルでの基本資料の提供という意味で重要な知見を与えております。



図の解説：

「右上」垂直方向一様電界下の体表誘導電界強度分布（赤が強電界部）。人体モデルは一様誘導体仕様。

「左下」水平前後方向一様磁界下の体断面誘導電流分布（赤が大電流部）。

人体モデルは内臓（脳・心臓・肺など）毎に一様導電性媒体仕様。

「右下」水平左右方向ダイポール磁界による体断面電流分布（赤が大電流部）

人体モデルは左下図と同じ。

電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「非線形回路に対する代数幾何学的アプローチ」

1. はじめに

当研究室では非線形回路に対する代数幾何学、特にGröbner基底の応用に関する研究を行っている。Gröbner基底は多項式環のイデアル基底であり、B.Buchbergerが指導教官の名前に因んで名付けたが、広中平祐氏がそれよりも前に「特異点解消」の論文の中で標準基底として定義しその存在を証明したものである。近年の計算機代数の進歩により、実際に数式処理を用いて計算し、応用することが可能になってきている。ここでは、非線形回路の分類と大域分岐図の分解についてGröbner基底の応用を紹介する。

2. 回路の分類

非線形回路における様々な現象を調べるためには、これまでは個々の回路についてそれぞれ解析を行う必要があった。ところが回路の決定方程式が代数方程式として表現できる場合は、Gröbner基底がイデアルの標準形となることを利用すると、それらの回路を分類することができる [1]。例えば、交流電圧源、抵抗、キャパシタ、非線形インダクタそれぞれ1個ずつからなる回路をすべて考えると8種類の回路が得られるが、基本調波に基づいてGröbner基底を求めることにより、5種類に分類できる。このような分類を用いると、同一グループに属する回路の解析は代表的な回路を1個解析するだけでよくなり、効率よい解析ができる可能性がある。

3. 大域分岐図の分解

非線形の回路解析には分岐理論がよく用いられるが、これは特異点近傍での解析である。したがってパラメータ空間上での大域的な分岐現象はこの方法では扱えない。それに対しGröbner基底を用いて消去イデアルを求めると、分岐図が代数曲線として表現でき、大域分岐現象を解析することが可能になる。また、因数分解等を用いて代数曲線を分離することにより、分岐点での特異点を取り除くことが可能となる [2]。例えば図1に示す回路において1/3分数調波振動の分岐図を求めると図2のようになる。図中実線は対称解、点線は非対称解を示しているが、これは状態変数 u_3 と電源電圧 E の14次式で表現される分岐図を4次式と10次式に因数分解して求めたものである。このように大域分岐図を分解することにより、対称性破壊分岐点 P_1, P_2, P'_1, P'_2 での特異点を取り除くことができる。

<参考文献>

- [1]K.Okumura,"Classifying Nonlinear Circuits by Gröbner base,"Proc. of NDES'98, pp.267-270, 1998.
[2]T.Hisakado and K.Okumura,"Algebraic Representation of Bifurcation Phenomena with Gröbner Bases," Proc. of NOLTA 2000, Vol.2, pp.767-770,2000.

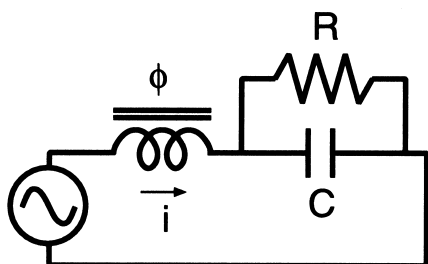


図1 非線形RLC回路

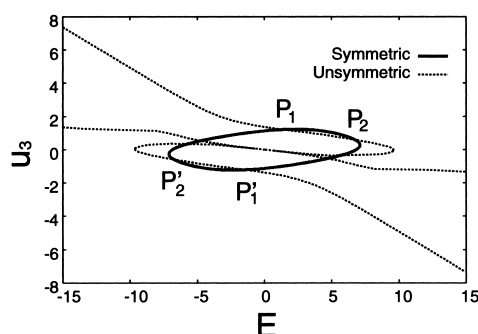


図2 1/3分数調波の分岐図

集積機能工学講座（鈴木研究室）

「固有ジョセフソン接合を用いた高温超伝導トンネル分光研究」

1. 固有ジョセフソン接合とは

高温超伝導は、質的な面でも量的な面でも従来の低温金属超伝導とは随分様相を異にしている。質的には、発現機構も異なるし、超伝導秩序パラメータの対称性も異なる。量的には超伝導転移温度 T_c が高いことはもちろん、コヒーレンス長は非常に短く、磁場侵入長は長く、それらの異方性は非常に大きい。そのために電気的磁氣的性質は準2次元的な振る舞いを示す。極端な場合には、準2次元の超伝導層が積層された構造と等価になる。層状結晶構造を有するビスマス系高温超伝導体はまさにそのような物質で、超伝導層間がジョセフソン効果で結合されており、天然の理想的なトンネル型ジョセフソン接合を形成している。この接合は一般に固有ジョセフソン接合またはイントリンシックジョセフソン接合と呼ばれている。図1にはビスマス系高温超伝導体の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の結晶構造を示す。2重の CuO_2 層が超伝導層で厚さが約0.3nmあり、これが1.2 nm厚さの絶縁層で隔てられており、超伝導層/絶縁層/超伝導層(SIS)型のトンネル型ジョセフソン接合を形成している。この接合が15nm間隔で積層されている。この固有ジョセフソン接合は、直流に対しては従来の単一のトンネル型ジョセフソン接合同様に振る舞い、高周波に対しては全く異なる振る舞いを示す。いずれの場合も、高温超伝導の理解のための物理面やエレクトロニクスへの応用面で非常に興味深く注目されている。ここでは当研究室で進めている、固有ジョセフソン接合を利用したトンネル分光による高温超伝導の物性研究を紹介する。

2. 層間トンネル分光

トンネル分光は超伝導の電子状態を探るのに非常に有効であり、普通SIS型のトンネル接合が使われる。高温超伝導ではまだSIS接合ができていないが、ここでもかわりに固有ジョセフソン接合を使うことができる。ただし、固有ジョセフソン接合は多数の接合が積層されているために、そのまま測定しても発熱や接合数の不明確さのため正確な分光ができない。そこで、ビスマス系高温超伝導体単結晶の表面から微細加工により $10\mu\text{m}$ 角、厚さ約30nmの微小部分を微細加工で切り出し、その部分のトンネル特性を測定した。10Kから220Kまでの温度範囲で測定した結果を図2に示す。また図2の挿図にはオシロスコープで観察した低電流域の I - V 特性を示す。11本の電流ステップが観察され測定している微小部分には実際11のジョセフソン接合が含まれているということがわかる。この方法で高温超伝導体のSIS接合特性を初めて観察することができ、トンネル分光に応用した。これを層間トンネル分光と呼ぶ。

3. 得られた理解

図2に示されたトンネル特性からいろいろな事実が明らかにされた。詳細な説明はスペースがないので省略するが、超伝導エネルギーギャップが約50meVで T_c で消滅すること（消滅しないという主張もある!）、常伝導トンネル抵抗の温度依存性から電子対形成の媒介相互作用はフォノンではなく電子電子相互作用であること、などである。この手法の研究はまだ始まったばかりで今後ますます発展するものと考えられる。

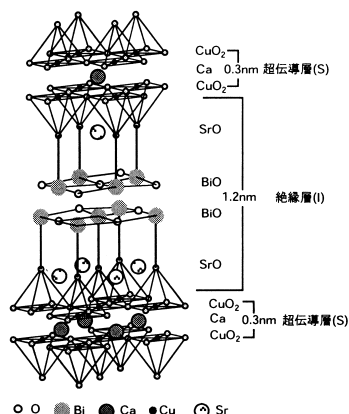


図1 固有ジョセフソン接合と高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の層状結晶構造。

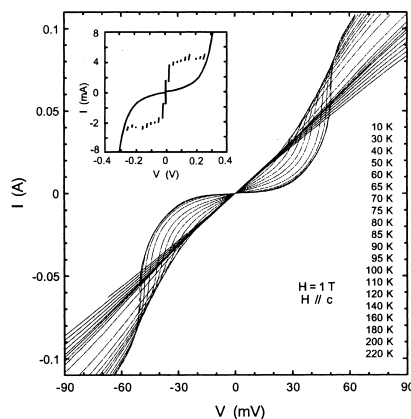


図2 11層の固有ジョセフソン接合の電流圧特性。挿図は低電流域のオシロスコープ像。

電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研究室）

「負イオン注入による高分子材料の生体適合性制御と人為的神経回路網形成」

近年、医用高分子材料の表面にイオン注入処理により、材料表面の生体適合性制御ができることが明らかになってきた。実際、ポリウレタン、シリコンゴム、ポリスチレンなどの高分子材料表面に正イオン注入を行うことによって、材料表面の血液適合性や牛血管内皮細胞の接着性を向上できるなどの報告が行われている。さらに、イオン注入法を駆使すれば、高分子材料表面の抗菌性や選択的細胞接着性など生物高機能性を付与することも期待できる。高分子材料の表面状態はイオン注入条件、すなわち注入エネルギーやドーズ量などに依存するが、イオン注入に正イオンを使用すると、表面の大きな帯電電位のためイオンが減速され、精確なエネルギーで注入されなかったり、精度よくドーズ量を計測できなくなったりする。しかし、本研究室で開発してきた負イオン注入法を用いると、絶縁物表面の帯電が非常に少なく、このような注入条件の不明確さはなくなり、精度の高いイオン注入が可能となり、高分子表面の生体適合性を非常に精確に制御できる。

図1は、ポリスチレン表面に、20 keVのAg⁻イオンを 3×10^{15} ion/cm² 注入した領域（図中左側の色の濃い部分）と未注入領域に、ヒト血管内皮細胞を培養し、表面への細胞接着特性を観測した位相差顕微鏡写真である。負イオン注入領域の生体適合性が向上し、細胞がしっかり接着している様子が分かる。このように、負イオン注入によって、高分子材料表面の生体適合性を自由に制御できることが分かる。

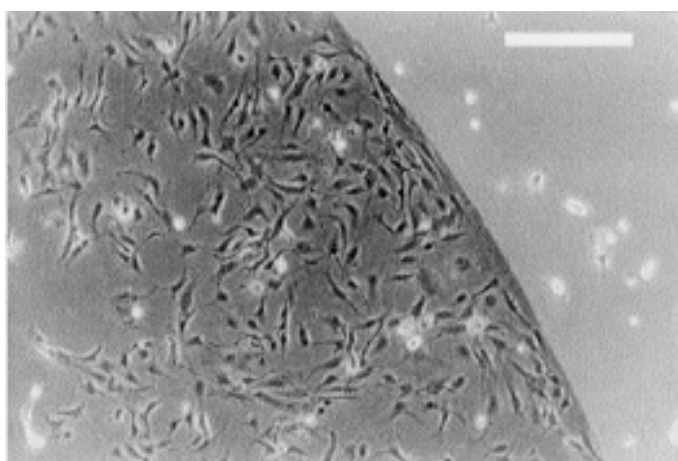


図1 ポリスチレン上にAg⁻イオン注入した表面へのヒト血管内皮細胞の接着の様子（左側が注入領域）

高分子材料表面の負イオン注入領域に選択的に細胞を接着できる成果を発展させて、研究室では、高分子材料表面に人為的に神経回路網を構築するための研究を行っている。図2は、スピンコートしたポリスチレン膜上にパターン化したAg⁻イオン注入（図1と同じ注入条件）領域へのPC12h神経細胞の接着の様子を示す。パターン化した形状（約60 μm幅の線状）内に、神経細胞が接着するとともに、黒い筋状の分化・伸展した神経突起も観測できる。このような方法を用いれば、人為的に神経回路網を構築できる可能性がある。それを用いて、将来は、神経細胞の情報伝達や蓄積機能などの解明、さらには、生体神経と外部半導体回路のインターフェースとして神経制御による次世代の義手・義足の開発に繋がたいと考えている。

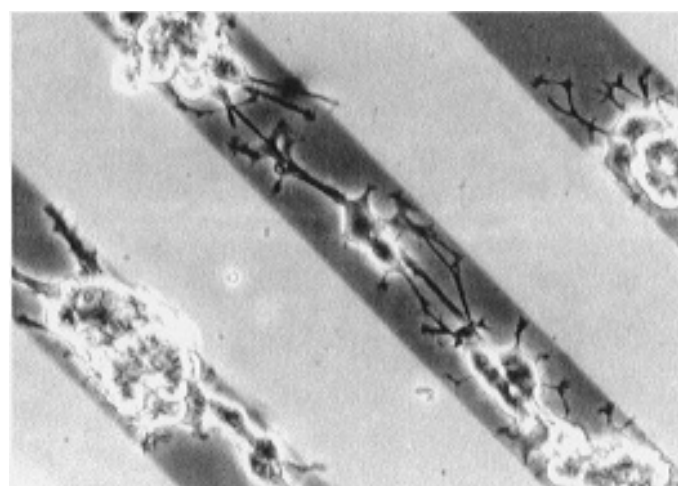


図2 スピンコートポリスチレン膜上にパターン化したAg⁻イオン注入領域へのPC12h神経細胞の接着の様子（色の濃い線が注入領域）

機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研究室）

「ワイドギャップ半導体SiCを用いた高性能パワーデバイス」

電力需要は増加の一途をたどっており、電気エネルギーの高効率利用が電気電子工学の分野における大きな課題となっている。現在、電力変換をハードウェアで支えているのは半導体Siのパワーデバイスである。しかしながら、Siパワーデバイスは、その物性上の制限のために理論的性能限界に近づきつつあることが指摘されており、より高出力化、低損失化、高速化を実現できる新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの開発が不可欠とされている。ワイドギャップ半導体であるSiCは、現用のSiに比べ、絶縁破壊電界強度が約10倍、熱伝導率が約3倍という優れた物性を持つので、これをパワー半導体デバイスに適用すれば、小型化、高速化が実現できるとともに、熱損失をSiデバイスの1/10以下に低減でき、デバイスの動作上限温度を300～400℃まで増大できるなど、各種の電気機器、システムの大幅な効率向上と高性能化が期待できる。

SiCパワーデバイスの実現には高品質の結晶成長技術が必要である。本研究室では、独自の技術によって高品質のSiC単結晶を成長させ、これを電子デバイスに適用する研究を続けてきた。近年、結晶成長装置と成長条件を改善することによって、残留キャリア密度が $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ (n型)で厚さ30 μm 以上のSiC成長層を得る技術を確認した。成長層中の深い準位密度も 10^{12}cm^{-3} 程度と少なく、少数キャリア寿命は200℃で約6 μsec 以上と長いことから、成長層が高品質であると言える。

まず、pn接合ダイオードをエピタキシャル成長により作製した。活性層となるn⁻層の厚さは31 μm 、ドナー密度は $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ である。作製したダイオードの電流－電圧特性を図1に示す。ダイオードは優れた整流性を示し、4200Vの高耐圧を達成した。順方向特性から求めたオン抵抗は $4.6 \text{m}\Omega \text{cm}^2$ であり、同耐圧のSi pinダイオードと比べて5倍以上優れている。

次に、パワーMOSFETの基礎となる反転型MOSFETを作製して評価した。従来はSiC(0001)面が用いられてきたが、MOS反転層のチャネル移動度が非常に小さい(室温で $10 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 以下)という問題が明らかになった。しかし、新たにSiC(11 $\bar{2}$ 0)面を用いることで大幅に特性を改善することができた。図2にSiC(0001)面および(11 $\bar{2}$ 0)面上に作製したMOSFETのチャネル移動度の温度特性を示す。(11 $\bar{2}$ 0)面上MOSFETでは室温でのチャネル移動度が $96 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と高く、温度上昇に伴ってフォノン散乱によって移動度が減少するという半導体デバイス本来の温度依存性が得られている。

今後は、パワー半導体デバイス作製に必要な要素技術をさらに発展させ、最終的には、Siパワー半導体デバイスの限界を大きく打破する、小型、高耐圧、低損失のSiCダイオード、縦型の電界効果トランジスタなどを試作し、実用への指針を提言したい。

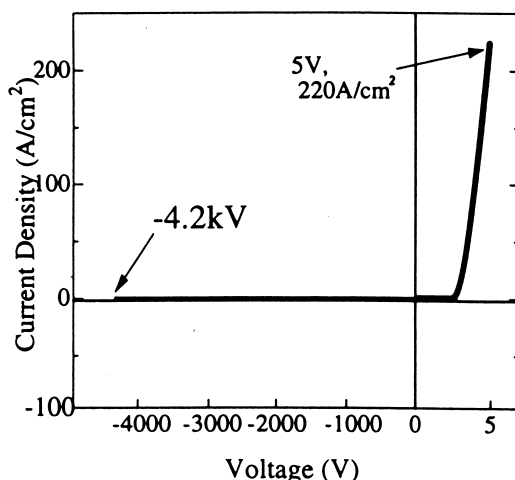


図1 SiC pnダイオードの電流－電圧特性

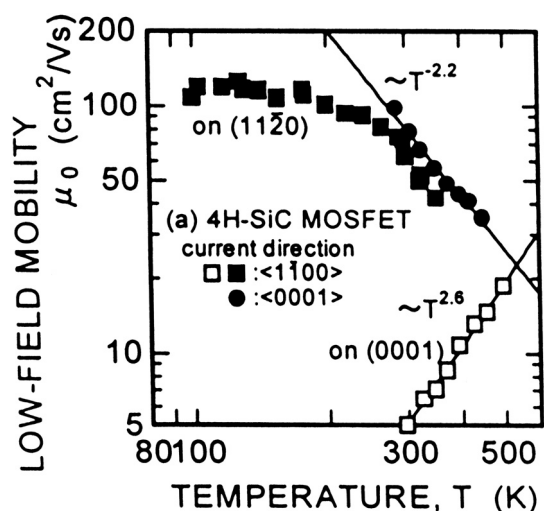


図2 SiC MOSFETのチャネル移動度の温度依存性

高機能材料工学講座（イオン工学実験施設） 「クラスターイオン援用蒸着法による高品位薄膜形成」

原子、分子、あるいはクラスター状のイオンビームと固体表面との相互作用を研究している。このような研究の中で、イオン照射による損傷形成やその回復過程のダイナミクス、および薄膜形成におけるイオン照射効果などを原子・分子レベルで明らかにしてきた。ここでは、クラスターイオンビーム援用蒸着法による薄膜形成の研究成果について述べる。

1. 研究の背景

原子や分子をイオン化して固体表面に照射する表面改質技術は飛躍的な発展を遂げ、多くの工業分野で応用されている。しかしながら、半導体産業に代表される今日の目覚ましい技術発展の中で、デバイスの高密度、高集積化に伴い、プロセス技術への要求がますます厳しくなっており、さらなる低エネルギーのイオンビーム技術の開発が求められている。巨大原子集団であるクラスターイオンは、従来の単原子イオンでは得られない超低エネルギー効果を有する。また、クラスターイオンは固体表面に衝突すると、固体表面に超高压、超高温照射効果を与える。さらに、酸素などの反応性ガス分子からなるクラスターイオン照射では、強い酸化反応効果が低基板温度で得られる。これらの効果は、良質な薄膜を低基板温度で形成するのに有効である。

2. 研究の成果

ガスクラスターイオン援用蒸着法を考案し、低抵抗・高透過率のITO薄膜の形成を行った。図1は作製したITO薄膜のAFM像を示す。酸素クラスターイオンビームが照射された薄膜は、表面が極めて平坦な透明導電膜が形成されていることが分かった。酸素クラスターイオン照射による酸化反応効果の促進およびラテラルスパッタによる超平坦化効果の促進によると考えられる。

図2は基板温度300℃で作製したITO薄膜のSn濃度依存性を示す。作製されたITO薄膜はSn濃度が5%で低抵抗になり、 $8.4 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}$ の低抵抗な透明導電膜が形成されていることが分かる。また、それ以上のSn濃度ではSnがキャリア電子の散乱体になり、抵抗率は増大している。

低抵抗・高透過率のITO薄膜形成を通して高品位薄膜が低基板温度で形成できることを実証した。さらに、ガスクラスターイオン援用蒸着法による超高度薄膜形成の研究も進んでおり、今後、様々な要求に応える材料プロセスとして、クラスターイオンビームの応用分野を広げ、展開できると思われる。

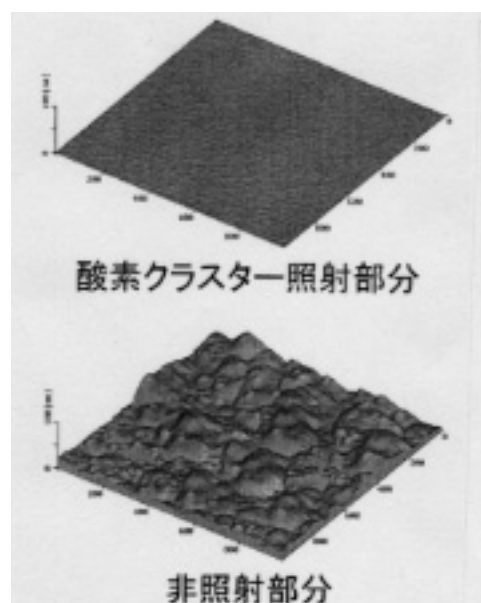


図1. 酸素クラスターイオン照射部分と未照射部分のITO薄膜表面のAFM像

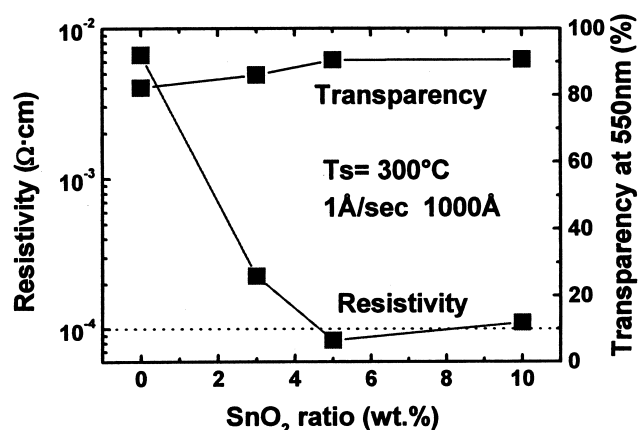


図2. 作製されたITO薄膜の抵抗率および透過率のSn濃度依存性

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室） 「移動対象の自動追跡・映像撮影システム」

1. 背景

ここ数年、セキュリティ・モニタリング、交通監視をはじめ、遠隔会議・講義さらにはTVスタジオの自動化のために、首振りビデオカメラをコンピュータで制御し、人や自動車を自動追跡してその映像を撮影するシステムの開発が盛んに行われている。本研究では、昨年の本誌で紹介した視点固定型パン・チルト・ズームカメラを利用した移動対象の自動追跡・映像撮影システム【2】を紹介する。

2. 研究成果

システムのタスクは、(1)シーン中に現れた対象を検出し、(2)パン・チルトを制御しながら対象を追跡すると同時に、(3)ズームを制御して対象の像をできるだけ高解像度で撮影する、というものである。

視点固定型パン・チルト・ズーム（FV-PTZ）カメラ【1】は、パン・チルト・ズームを変化させてもその投影中心が移動しない首振りカメラであり、図1に示す背景差分による対象の検出・追跡システムが容易に構成できる。具体的には、

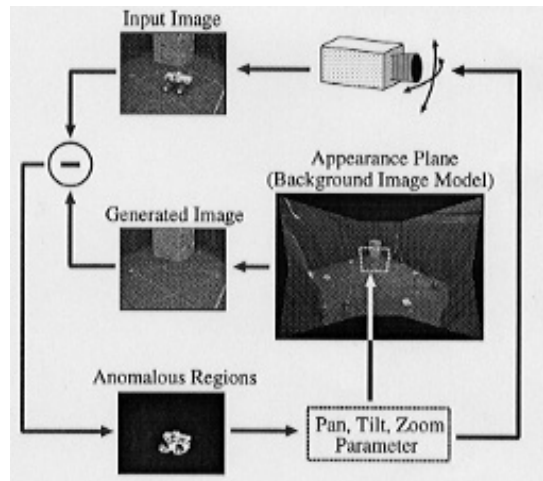


図1 FV-PTZカメラを用いた対象検出・追跡法

1. 対象のいないシーンの全体像を、FV-PTZカメラの首を振りながら撮影し、得られた画像群を1枚の広角パノラマ画像として記録する。（図1右中央の画像。FV-PTZカメラでは、継ぎ目のないパノラマ画像が容易に合成できる。）
2. 対象検出・追跡時は、画像撮影時のパン・チルト・ズーム値を基に、パノラマ画像から現在の観測画像と一致する画像を切り出し、それを背景画像とする。
3. 観測画像と背景画像の差を計算し、変化領域の有無により対象の存在を判断する。
4. 対象が存在する場合は、変化領域の面積と重心を求め、それらを対象の大きさと位置とする。また、時間的に連続する2フレームの観測画像に背景差分を適用し、対象位置の変化量から対象の移動角速度を求める。
5. 得られた対象の位置・大きさ・運動情報を基にパン・チルト・ズームを制御し、(2)からの処理を繰り返す。
6. 対象が存在しないときは、予め決められた軌跡に沿ってカメラの視線を制御し、対象を探す。

ラジコン自動車を実験室（約4m四方）内で人間が適当に操縦し、高さ約2.5mの位置から床面を見下ろすFV-PTZカメラによってその検出・追跡を行った結果を図2に示す。

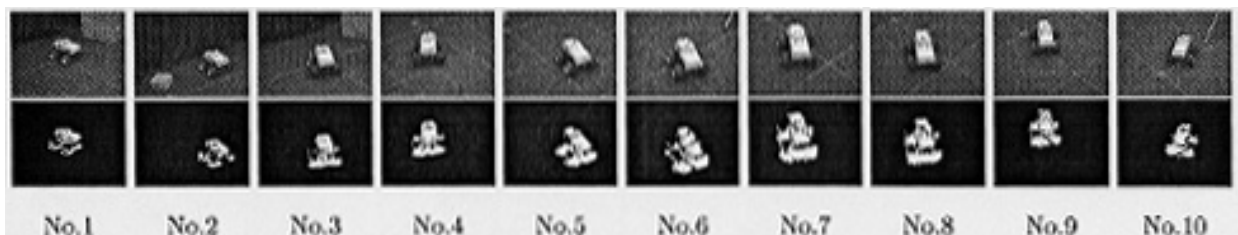


図2 ラジコン自動車の追跡結果(上段:入力画像、下段:差分画像)

参考文献

- 【1】 和田俊和、浮田宗伯、松山隆司：視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用、電子情報通信学会論文誌、Vol. J81-D-II, No.6, pp.1182-1193, 1998
- 【2】 松山 隆司、和田 俊和、物部 祐亮：視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡、情報処理学会論文誌、Vol.40, No.8, pp.3169-3178, 1999

通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室）

「アダプティブアレーアンテナと干渉キャンセラの統合による移動通信の誤り率改善」

近年、移動通信とインターネットが結びついたサービスの需要が急速に伸びている。快適な無線インターネットサービスの実現には、高速広帯域の大容量移動通信サービスの実現が急務である。次世代移動通信システム（IMT-2000）の無線伝送方式としてDS-CDMA（直接拡散符号分割多元接続）の採用が決まり、日本では来年5月からW-CDMA方式を採用した商用サービスの開始が予定されている。

DS-CDMA方式では、各利用者に固有の拡散符号と呼ばれる広帯域信号が割り当てられ利用者の識別が行われる。ところが、同時に同一周波数帯域を用いるため、各利用者間の拡散符号の相互相関に起因して他局干渉が発生する。この結果、多元接続可能な利用者数に制限が生じる。他局干渉を抑圧する方法としてこれまでに様々な技術が検討されているが、中でもアダプティブアレーアンテナやレプリカ減算型干渉キャンセラは優れた他局干渉抑圧能力を示すことが知られている。

アダプティブアレーアンテナは干渉波の到来する方向にヌル点を向けることにより他局干渉を効果的に抑圧できるが、所望波と同じ方向から到来する干渉波やアンテナ素子数以上の干渉波すべてを抑圧することはできない。一方、レプリカ減算型干渉キャンセラは他局信号の受信予測値（レプリカ）を作成し、それを受信信号から差し引くことにより他局干渉を抑圧する。このレプリカの精度は受信信号の仮判定精度（等価的には他局干渉量）に大きく依存する。

本研究では、図1のように両者を組み合わせることにより相乗的な改善効果が得られる方式を狙っている。まずアダプティブアレーアンテナで他局干渉をできる限り抑圧し、その後の信号に対してレプリカ減算型干渉キャンセラを適用する。本方式では、レプリカ減算型干渉キャンセラにおける受信信号の仮判定精度を高めることができ、より大きな他局干渉の抑圧が期待できる。提案方式のビット誤り率特性（計算機シミュレーション）を図2に示す。レイリーフェージング伝搬路においても、アダプティブアレーアンテナあるいはレプリカ減算型干渉キャンセラを単独で用いる場合に比較して、特性が大きく改善されることが確認された。現在、両者間の最適な機能分担などについても研究を進めている。

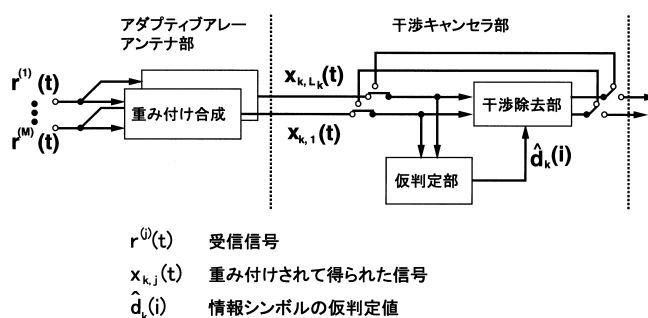


図1 アダプティブアレーアンテナと干渉キャンセラの統合

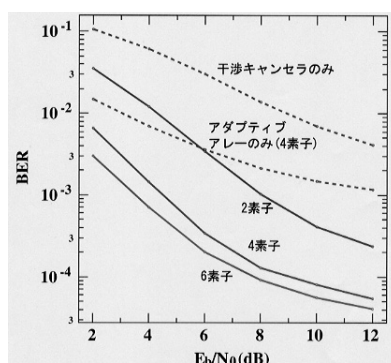


図2 アンテナ素子数を変化させた場合のレイリーフェージング伝搬路におけるビット誤り率（BER）特性

集積システム工学講座 大規模集積回路分野(小野寺研究室) 「実時間動画画像圧縮伸長アルゴリズムとハードウェア」

ビデオCD用のMPEG1に始まった動画画像の標準圧縮規格は、TV・BSデジタル放送、DVD記録用のMPEG2、低ビットレート用のMPEG4が標準化されている。動画画像の圧縮には、画像の持つフレーム内とフレーム内の相関を用いる。MPEGでは、フレーム内の相関の圧縮にDCT(離散コサイン変換)を用いる。DCTはFFTの一種であり、画面から切り出した矩形領域の垂直、水平の周波数成分を取出す。相関が大きい場合、高周波成分は0を持つ確率が高く、その成分を切り落とすことにより圧縮を行う。フレーム間の相関を圧縮するには、現在のフレームの矩形領域が、前のフレームのどの部分にもっとも近いかを探索する動き補償を用いる。探索範囲を広げれば、動き補償の精度は上がるが、計算量は非常に大きくなる。

DCTは、その計算量が非常に大きい。我々はフレーム内の相関の圧縮に、ベクトル量子化 (Vector Quantization、VQ) を用いた動画画像圧縮アルゴリズムならびにそのハードウェアの研究を行っている。ベクトル量子化は、画面から切り出した矩形の領域(入力ベクトル)をあらかじめ用意した有限個の矩形領域のパタン(参照ベクトル)のもっとも近いもののインデックスに置き換えることにより圧縮を行う。例えば入力ベクトルが8ビット16次元(4×4 の矩形領域に相当)であり、64個の参照ベクトルを用意した場合、圧縮率は、 $16 \times 8 / (\log_2 64) \div 21$ となる。VQは、圧縮処理はほぼDCTと同じ計算量が必要であるが、伸長は送信されたインデックスを参照ベクトルにおきかえるテーブルルックアップと呼ばれるメモリ参照の処理だけで行われるので、圧倒的に計算量が少なくなる。

我々はVQに動き補償を組合わせ、29.2kbpsの低ビットレート下で、毎秒10枚のQCIF(176×144)サイズの動画画像を送信できるFRMSHVQ(固定レート階層化ベクトル量子化)アルゴリズムを提案し、低消費電力で実時間にFRMSHVQを実行できるLSIの開発を行ってきた。1996年には、ベクトル量子化を参照ベクトル並列に行うために、SRAMに演算機能を付加して並列プロセッサとしたFMPP-VQ(図1)の試作ならびにPCとFMPP-VQを使った実時間動画画像圧縮伸長システムの試作を行った。FMPP-VQは入力ベクトルと参照ベクトルとの距離を64個上で並列に求めることで、ベクトル量子化の高速化を図っている。このシステムでは、VQのみを専用プロセッサFMPP-VQ上で行い、その他の処理はPCのCPU側で行っている。FMPP-VQでは100mWと低消費電力化が達成できたが、その他の処理はPC上で行われるので、システム全体としての低消費電力化は不可能である。次に、FRMSHVQアルゴリズム全体を高速化するために、16並列のデジタル信号処理量プロセッサ(DSP)であるVP-DSPを1999年に設計試作した。図2にそのチップ写真を示す。VP-DSPは、動き補償とベクトル量子化を16並列に行うことにより高速化を行う。FRMSHVQは乗算を必要としないので、乗算器を省くことにより、大幅に小面積化を図った。VP-DSPは実時間動画画像圧縮に必要な25MHzで49mWという低消費電力を達成した。

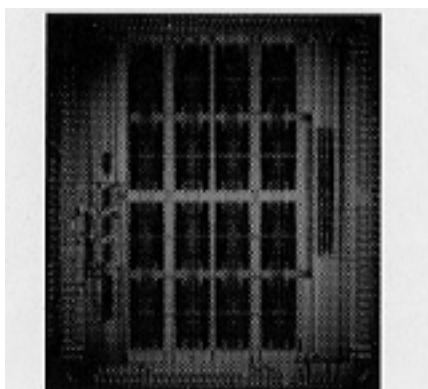


図1 FMPP-VQのチップ写真 (0.7 μ mプロセスで試作)

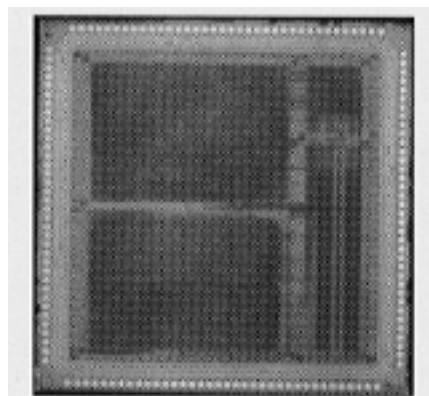


図1 VP-DSPのチップ写真 (0.35 μ mプロセスで試作)

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮和研究室） 「アフェクティブインタフェース」

1. アフェクティブインタフェースとは

アフェクティブインタフェースとは、人間と機械の間に位置するヒューマンインタフェースに感情を扱う機能を持たせたものであり、人間の感情に適応することで機械と人間の円滑なコミュニケーションを実現するものである。アフェクティブインタフェースには、人間の感情を認識する入力チャネルと人間に感情を提示する出力チャネルがある。本稿では顔表情によるアフェクティブインタフェースの基礎技術として、入力チャネルである顔表情認識、および出力チャネルである顔表情合成の研究を紹介する。

2. 顔表情認識

顔表情認識では、図1に示すようにカラーCCDカメラで撮影された顔表情からリアルタイムで表情の種類とその強さを認識する。顔表情認識には様々な手法が提案されているが、この研究では心理学分野における表情研究の知見を利用するとともに認識処理のリアルタイム性とロバスト性に着目して、顔画像から顔器官上に設定した18の特徴点の位置を画像処理により検出し、その時間変化から顔の上部・中央部・下部における基本6表情(喜び、驚き、怒り、悲しみ、恐怖、嫌悪)と無表情(中立)の強さをファジー推論する方法を開発した。また、被験者実験により、各ビデオフレームにおいて90%以上の高い認識率とリアルタイムでの処理(平均31.8ms)を確認した。

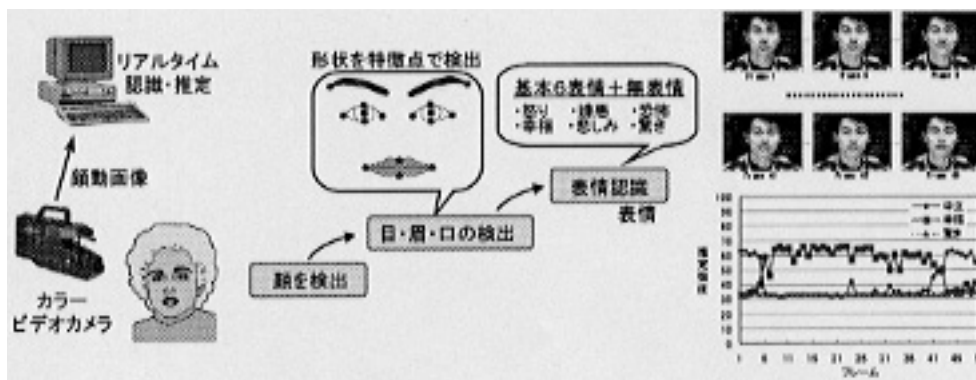


図1 顔表情のリアルタイム認識手法と認識例

3. 顔画像合成

人間の顔表情は、皮膚の下にある表情筋の弛緩・収縮によって顔面皮膚が移動し表出される。顔画像合成では、図2に示すように3D顔ポリゴンモデル上に29の仮想的な表情筋を設定し、その弛緩・収縮による皮膚表面の移動をリアルタイムで模擬することによりアニメーションとして表示する。この研究では、自然な表情の合成のために、基本6表情表出時の各表情筋の収縮量と時間変化パターンを被験者実験により求めている。

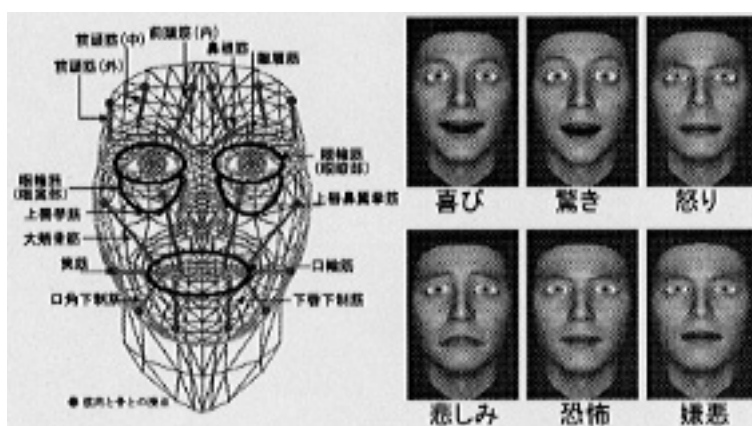


図2 3Dポリゴンモデル上に配置した表情筋モデルと表情合成例

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野（井上研究室） 「トーラス系装置からの荷電粒子引き出しの研究」

電場の加わったプラズマ中の荷電粒子は、電場による加速を受けると同時に動摩擦力による減速を受けますが、動摩擦力は粒子の速度の二乗に反比例するので、ある大きさの以上の速度を持つ粒子は、動摩擦力を振り切って電場により際限なく加速されることになります。このような加速は、とくに速度の大きな電子が受けやすく、加速によって速度分布の重心よりどんどん離れていく電子は、逃走電子（runaway electron）と呼ばれています。ヘリカル装置やトカマクなどのトーラス状のプラズマ閉じ込め装置では、閉じ込めているプラズマ中で逃走電子が発生すると、その電流値は数MAも達することもあり、磁場で閉じ込めきれなくなった電子が装置壁面などに衝突すると、不安定性によるプラズマ閉じ込め効率の低下だけでなく、装置の損傷なども引き起こすため、その対策が重要となっています。

一方、近年、高エネルギー電子は、殺菌、害虫駆除、汚染物質の分解、材料加工などに多方面において利用が始められていますが、これまでの電子源では数十A程度の電流の電子ビームしか得られていません。そのため、工業的な大量処理を行うためには、更なる大電流電子源の開発が望まれています。

そこで、本研究では、プラズマ閉じ込め装置から制御された状態で逃走電子を引き出すことによって、大電流電子源として利用することが可能であるかを検討しています。具体的には、比較的コイル間の間隙が大きく、引き出し点を作りやすいと考えられるヘリカル装置を対象として、逃走電子をガイドする引き出しコイルの位置・形状について、プラズマ閉じ込め磁場への最小とするものを、磁場および電子の軌道計算により、探索しています。

図1はコイルの配置例を示していますが、実際の引き出しコイルであるC・Dの閉じ込め領域への影響をうち消すために多くのコイルを必要としています。また、応用を考えて図2のように円周の特定の部分のみに引き出す様に配置をする場合には、コイルへの電流フィードの影響が大きくその最適化が必要でした。現在は実証実験が可能な小型装置の検討を進めています。

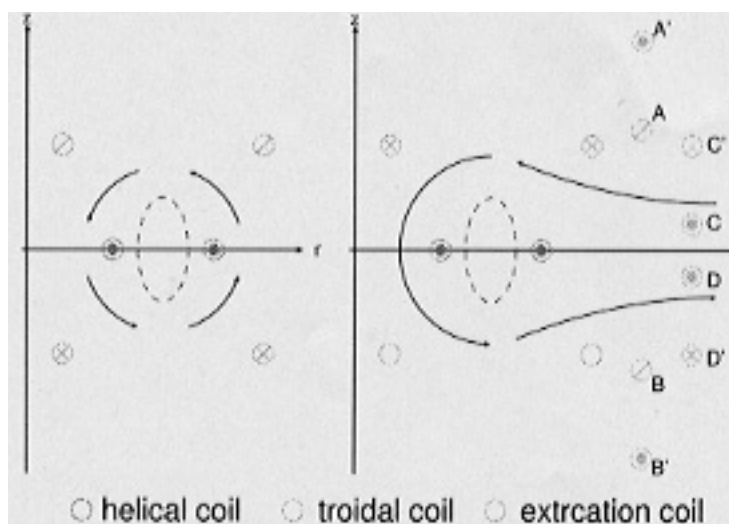


図1 引き出しコイルの配置と磁力線

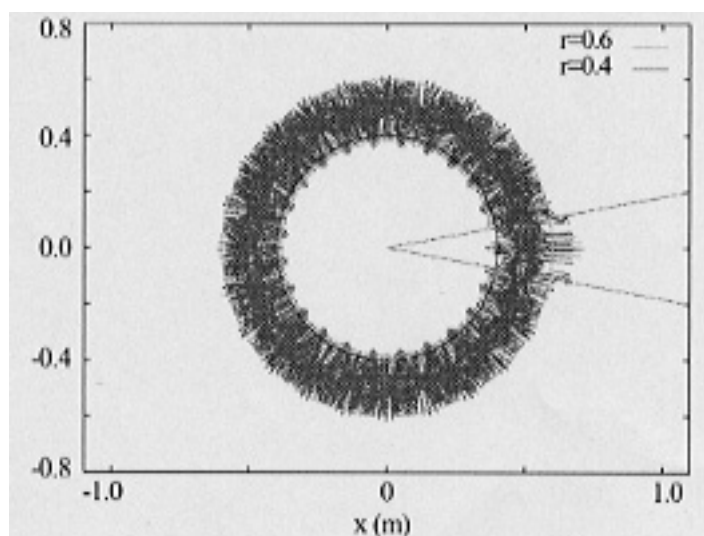


図2 引き出しコイルを一部のみに付けたときの磁力線の計算例

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野（佐野研究室） 「ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化」

複合系プラズマ研究分野では、従来研究を進めてきたヘリカル・ヘリオトロン配位（ヘリオトロン E 装置）に、ヘリカル磁気軸を導入することによって、新しいパラメータ領域のプラズマを実現し、そのコアプラズマの閉じ込め性能を実験的に明らかにすることによって、ヘリカル磁場配位の最適化のための新たな知識基盤を獲得することを目的とした研究（ヘリオトロン J 装置）を展開したところです。ヘリオトロン J 装置の諸元はプラズマ大半径：1.2 m、平均プラズマ小半径：0.15～0.20 m、磁場強度：1.0～1.5 T、低磁気シアをもつ回転変換：0.3～0.8、プラズマ周辺部の磁気井戸：～1.5 %、加熱装置として 0.5 MW(53GHz)-ECH、1.5 MW-NBI、2.5MW-ICRF を用意しています。

現在、この方面の世界の新しい研究動向として、（１）準対称系（対称性の方向の運動量が運動の恒量になることにもとづく）と（２）quasi-isodynamic(omnigenous) 系（磁気面上での縦の断熱不変量が一定であることにもとづく）の開発があります。準ヘリカル対称系としては、米国ウィスコンシン大学の H S X の実験が昨年より開始されました。準軸対称系としては、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所及び核融合科学研究所が、電流駆動型の準軸対称系（NCSX, CHS-qa）の設計研究を進めています。一方、quasi-isodynamic系では、ドイツのマックス・プランク研究所で建設中の W 7 - X 及び米国オークリッジ国立研究所が設計研究を進めている QOS 装置があり、ヘリオトロン J の研究計画は、これらの世界の研究計画と相補的・補完的な位置づけにあります。

平成12年10月までに得られたヘリオトロン J の実験成果としては、(i)当初計画に則って平成12年3月、閉じ込め装置としての建設及び立ち上げを完了したこと（図1参照）、(ii)2ヶ月間の総合通電試験において、コイル系の通電性能を検証し終えたこと、及び (iii)平成12年7月から開始された第1期の第2高調波53GHz-ECH実験において、200～400kWのECH加熱入力に対して、プラズマ内部エネルギーとして、約0.7kJを既に達成し（図2参照）、ヘリカル系における標準的なエネルギー閉じ込め比例則（ISS95比例則）に、ほぼ近い値まで得られた点などがあげられます。装置性能の比較として、例えば、同じヘリカル軸装置であるスペインのTJ-II装置のECH実験（平成12年10月のIAEA会議報告）との予備的な比較では、ECH加熱入力400kWに対して、両装置とも略同一の内部エネルギー密 1 kJ m^{-3} が得られており、今後の詳細な比較検討が楽しみです。これら以外に、ヘリオトロン J の弱磁（300G）での、真空磁気面測定を行い、物理設計で計画された閉じ込め磁気面の健全性を確認しました。これらの成果は、本研究計画を円滑に遂行するうえで、基盤となるものと考えています。

〔文献〕 佐野史道、大引得弘、花谷清、水内亨、岡田浩之、長崎百伸、近藤克巳、若谷誠宏、中村祐司、中須賀正彦、別生栄、横山雅之、“ヘリカル軸ヘリオトロン装置（ヘリオトロンJ）実験計画”、J. Plasma and Fusion Research, 75 (1999) 222 - 229.

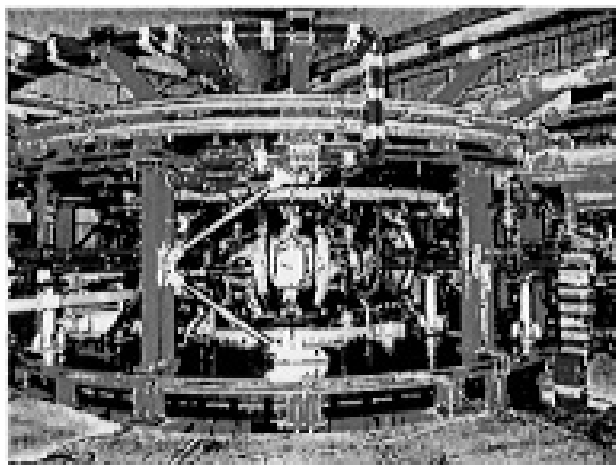


図1 ヘリオトロン J 装置

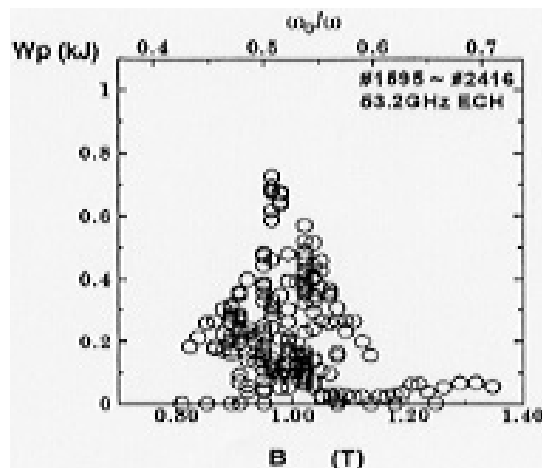


図2 ECH加熱実験における内部エネルギー

地球電波科学研究部門 大気圏光電波計測分野（津田研究室） 「ライダー（レーザーレーダー）による地球大気の観測」

当研究室では、電波・光・音波など大気中を伝搬する波動現象を用いて地球大気の物理パラメータ（風速、温度、湿度 etc.）を計測するリモートセンシング技術を開発し、また実際に地球大気の観測に用いて研究を行っております。さらに計測した物理現象を解釈するためのモデリング（計算機シミュレーション）も行っております。さて、本年3月に当センターの信楽MU観測所（滋賀県信楽町神山）に新たにライダー（レーザーレーダー）システムを開発し導入いたしました。今回はこのライダーシステムについて報告します。

宙空電波研究センターの信楽MU観測所では、世界有数の高性能大型大気観測レーダーであるMUレーダー(46.5MHz, 1 MW出力)を用いて、1984年の開所以来地上から上空500kmまでの地球大気の運動を観測し、地球大気環境変動にかかわる大気の性質を明らかにしてきました。ところが、長期的な地球大気環境変化の舞台である10-100kmの中層大気の中でもオゾン層などが存在する20-60kmの大気についてはMUレーダーの巨大な電力の電波をもってしても大気からの散乱電波が大変微弱であり、十分に精密な観測を行うことができませんでした。そこで、レーダー観測を補完するために、レーザー光線を用いたレーダー装置であるライダー（レイリー/ラマン・ライダー）を設置しました。この観測装置は、Nd:YAGレーザーの強力な光（532nm, 600mJ, 50Hz）を鉛直上方にむけて発し、大気からの散乱光を受信します。受信には、口径82cmと35cmの大小2つの望遠鏡を用いており、合計4系統のフォトンカウンティング（光子計数）システムを備えています。窒素や酸素分子からのレイリー散乱光を受信することで、高度30kmから90km前後までの大気の密度や温度を測定するほか、607nmの窒素分子の振動ラマン散乱、および660nmの水蒸気の振動ラマン散乱を受信することで、地上30kmまでの温度や、対流圏（高度約10kmまで）の水蒸気プロファイルを測定することが可能です。中層大気の温度は地球温暖化にともなう変化が観測で敏感に現れることが明らかになっており、精密かつ継続的な観測が求められている重要な観測対象です。水蒸気の観測はMUレーダーによる対流圏の風速・温度観測と同時に行うことで種々の気象擾乱現象の解明に貢献するものと期待されます。

ライダーシステムは7月までに調整が行われ、8月から観測に用いられていますが、この夏はちょっとしたUFO騒ぎが信楽町でおこりました。観測所から鉛直上方に発せられる緑色のレーザー光が町内から目撃され、とくに雲があるとミー散乱光で数km先でも見られたようです。本ライダーは、可視光を用いるライダーでは国内でもっとも強力なレーザー光を発していますから、目撃されるのももっともなことです。信楽町、阿山町両町の役場を通じて広報したおかげで、現在では観測所への問い合わせがなくなりました。みなさんも晴れた夜に信楽町周辺を通られるときはちょっと車を止めてレーザー光で観測が行われていないか確かめてみてください。



ライダーでの観測風景(手前はMUレーダーアンテナ)

地球電波科学研究部門 グローバル大気情報解析分野

「GPS受信網を用いた電離圏全電子密度の水平構造の研究」

地上から宇宙空間に至るまで連続に存在する大気は、その上部においては太陽放射に含まれる紫外線・X線によって一部がイオンと電子に分れ、プラズマになっています。このうち高度100～1000 kmの領域は「電離圏」と呼ばれています。(F層、E層と呼ばれる成層構造をなすことから「電離層」とも言われます。)電離層反射を用いる短波通信が国際通信の主役であった時代は過ぎ去ってしまいましたが、衛星通信に対してもシンチレーションを生じる等影響は大きいものがあります。また電離圏は、地球大気が宇宙環境と交わる領域であって、太陽放射による地球環境変動を解き明かす上でも重要です。現在建設が進められている国際宇宙ステーションの軌道が高度330～480 kmであることから分かるように、この領域は、人類の新しい生存空間として今拓かれつつあるといえます。さて、衛星利用の一形態としてGPS衛星を用いた測位が知られています。最近の自動車ナビゲーション装置の普及や受信機の小型化は驚くべきものですが、実は日本には、国土地理院によって全国千地点以上にGPS受信機が設置され、1994年から30秒毎のデータが蓄積され続けています。平均的な地点間距離が25 kmというこのGEONET(国土地理院GPS連続観測システム)は、その受信機分布の密度と規模の両面において世界一のネットワークであり、その測位データは主として地殻変動あるいは地震研究のデータベースとして活用されています。最近の火山噴火でも、地殻変動の観測に活躍しています。図1に示すように、GPS衛星からの電波は地球大気を通過して地上で受信されるため、電離圏を通過する際の伝搬遅延が測位結果に誤差をもたらしますが、GPSシステムは、個々に電離圏の影響を受けた2周波の電波を用いることで、この誤差を補正しています。逆にいうと、このデータを用いることで、電離圏の全電子数(TEC; Total Electron Content)を測定することが可能です。GPS衛星から受信機までの伝搬パス上のTECを求め、中心高度の代表値とすることによって、日本上空の電離圏プラズマの密度分布がくまなく調べられます。図2に、GEONETデータに基づくTECの水平分布(変動分)を示しますが、この例では夜間のF層高度に波長約100 km、周期約30分の波動が現れて南西方向に伝搬している様子がわかりました。電離圏の波動現象の水平構造をこのような細部にわたって観測可能なシステムは今まで存在しませんでしたので、この成果は国内外の研究者から驚きの声を持って受け止められました。現在、国土地理院、京都大学理学部地球物理教室及び名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で、TEC推定方法に関する研究や種々の波動現象の研究を推進するとともに、30秒毎に取得され続ける膨大なデータをデータセンターから自動的に受信してTECデータに変換する、自動データ取得システムの開発を行っています。

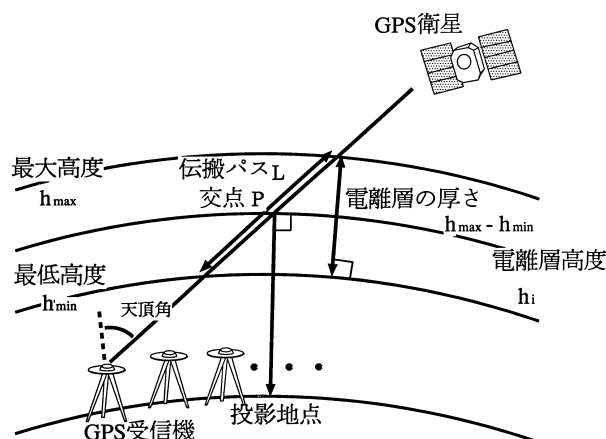


図1 GPSを用いた電離圏全電子数測定概念図

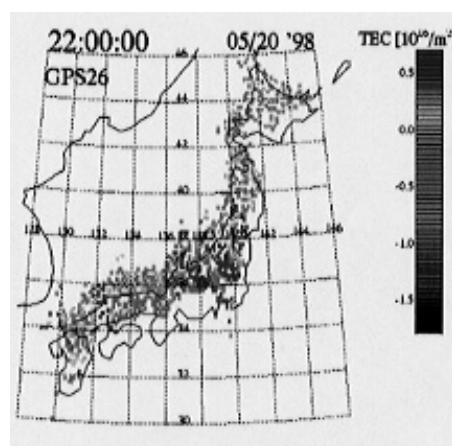


図2 日本上空の電離圏全電子数(変動分)の水平分布

宇宙電波科学研究部門 宇宙電波工学分野 (松本研究室) 「北極上空でのロケットによるプラズマ波動観測」

当研究室は、宇治の宙空電波科学研究センター及び大学院情報学研究科通信情報システム専攻に所属し、来るべき21世紀の人類宇宙開拓の時代に向けて、太陽系空間電磁環境や宇宙太陽発電所（SPS）の研究など、理学、工学の両面から宇宙科学・宇宙電波工学の研究を行なっています。本稿では研究テーマの一つである「科学衛星・ロケットによる宇宙空間におけるプラズマ波動観測」に関する研究で、2000年11月に北極圏での打ち上げを予定している「SS-520-2ロケット実験」について紹介します。

多くの方はすでにご存知かもしれませんが、太陽からは電気を帯びた風が地球に向かって吹いてきています。この太陽風が絶えず、地球に向かって吹き付けているわけですが、地球固有にもっている磁場がこの太陽風が大気や大地に直接吹き付けることをさえぎってくれています。この地球の磁場に守られた領域のことを「地球磁気圏」と呼びます。この地球磁気圏の中で唯一、太陽風に対するバリアが弱く口を開いたようになっている領域があります。これが、北極と南極上空に形成されている「カスプ」という領域です（図1参照）。このカスプ領域では、太陽風プラズマが入りこんできているばかりでなく、逆に、そこから地球大気が大量に宇宙空間に向かって「流出」している現象も起きています。そこから

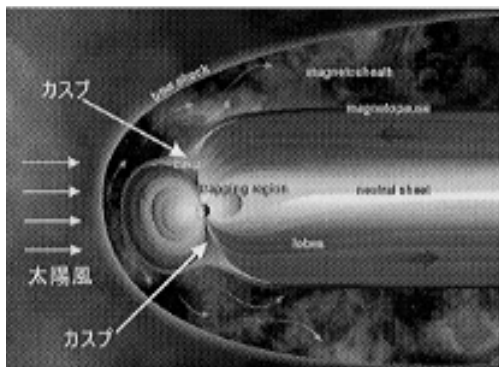


図1 地球磁気圏とカスプ領域

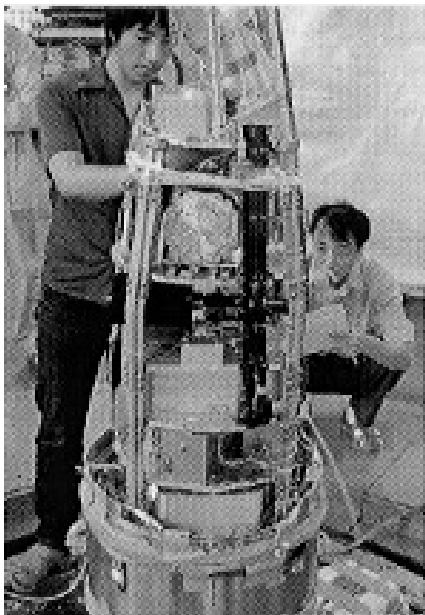


図2 組み立て・試験中のSS-520-2ロケットの観測機搭載部

流れだしているのは主に、酸素原子と水素原子がイオン化したもので、特に酸素イオンのように重い粒子がどうして地球から宇宙空間に向かって流れ出しているのかが謎になっています。そして、最近のレーダーなどによる地上観測で、その酸素イオンを宇宙空間に押し出している(加速している)しくみがカスプの中で高度1000km程度に存在しているようだ、ということがわかってきました。そこで私達は、文部省の宇宙科学研究所と共同でロケット実験SS-520-2を計画し、本年（2000年）11月の打ち上げに向けて観測機器の開発、試験を行い、その準備をすべて完了しました。この実験では、ノルウェーのニューオールソンという北極圏

の発射場に我々日本の観測ロケットをセットし、高度1000kmのカスプに向けて発射します。私達が開発した「プラズマ波動観測機」は、これまでにない新しい技術を取り込み、CPU/DSPを搭載したコンピュータ制御の受信機になっています（図2）。高度数100mで10mの長さのアンテナと1m四方のループアンテナを展開してそれらによって、酸素イオンを押し出しているプラズマ波動を観測します。ロケットは打ち上げてから約10分で高度1000kmに到達し、その後は10分かけて落下、最後は北極の海に落ちます。その間の観測データは電波で地上に送られます。打ち上げ予定は11月25日。北極地方は日が24時間昇らない真冬です。私達はこの発射に向けて現地での準備に11月中旬から入ります。恐らくこの記事が印刷されて配布されている頃には、私達のロケットは無事に打ち上げられ、データを地上に送り届けた後、北極の海底で役割を終えて眠っていることでしょう。